

Leitung

Stefan Bringezu (WI)

AS2.1: Umweltrelevante metallische Rohstoffe

Dominic Wittmer (WI), Michael Scharp (IZT), Stefan Bringezu (WI),
Michael Ritthoff (WI), Martin Erren (WI), Christoph Lauwigi (Ifeu),
Jürgen Giegrich (ifeu)

AS2.2: Weltweite Wiedergewinnung von PGM

Rainer Lucas (WI), Henning Wilts (WI), Stefan Bringezu (WI)

AS2.3: Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen

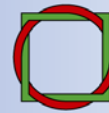
Sören Steger (WI), Miriam Fekkak (WI), Stefan Bringezu (WI),
Michael Scharp (IZT)

Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen

Zusammenfassung

Zusammenfassung der Ergebnisse des Arbeitspakets 2 des
Projekts „Material-effizienz und Ressourcen-schonung“ (MaRess)





Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

**Wuppertal Institut
in Kooperation mit**

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopool
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW

Kontakt zu den Autor(inn)en:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

AS2.1: Dominic Wittmer
Tel.: +49 (0) 202 2492 -181, Fax: -138
Mail: Dominic.Wittmer@wupperinst.org

AS2.2: Rainer Lucas
Tel.: +49 (0) 202 2492 -260, Fax: -138
Mail: Rainer.Lucas@wupperinst.org

AS2.3: Sören Steger
Tel.: +49 (0) 202 2492 -162, Fax: -138
Mail: Sören.Steger@wupperinst.org

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRess) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145
Mail: kora.kristof@wupperinst.org
peter.hennicke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)
finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen

Zusammenfassung

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
1 Umweltrelevante metallische Rohstoffe (AS2.1)	5
1.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes	5
1.2 Ergebnisse	6
1.2.1 Klassifizierung der Metalle hinsichtlich Kriterien zur Umweltrelevanz und Seltenheit	6
1.2.2 Vertiefende Untersuchung zu zehn ausgewählten Metallen	6
1.3 Handlungsoptionen	9
2 Weltweite Wiedergewinnung von PGM (AS2.2)	12
2.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes	12
2.2 Ergebnisse	13
2.2.1 Rahmenbedingungen und Trends im PGM-Recycling	13
2.2.2 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Autoabgaskatalysatoren“	15
2.2.3 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Elektro- und Elektronikgeräten“	17
2.3 Übergreifende Aspekte eines internationalen Governance-Ansatzes zur Steuerung der Stoffströme im PGM-Recycling	19
3 Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen (AS2.3)	21
3.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes	21
3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse	22
3.2.1 Verkehrsinfrastruktur	22
3.2.2 Wasser- und Abwasserinfrastruktur	23

3.2.3	Energieinfrastruktur (Elektrizität, Gas, Wärme)	24
3.2.4	Telekommunikationsinfrastruktur	25
3.3	Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der jährlichen Materialströme für leitungsgebundene Infrastrukturen und weiterer Forschungsbedarf	26
Literatur		28

Abbildungen

Abb. 1.1:	Referenz-Metallsystem zur Darstellung der Metallkreisläufe und ihrer Verluste	7
Abb. 2.1:	Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge im Jahr 2008	16

Tabellen

Tab. 1.1:	Übersicht über die relativen Verluste innerhalb der einzelnen Prozesse sowie den gesamten jährlichen Materialverlust der untersuchten Metalle	8
Tab. 2.1:	Entwicklung des globalen Verbrauchs von Platin, Palladium und Rhodium bezogen auf unterschiedliche Anwendungsfelder (2008-2010) in Tonnen	14

Vorwort

Um die Erfordernisse und Möglichkeiten der Ressourceneffizienzsteigerung in wichtigen, bislang unzureichend erforschten Bereichen zu ermitteln, wurde die Wissensbasis zu **umweltrelevanten metallischen Rohstoffen**, zur **Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen** sowie zu den in **Infrastrukturen** gebundenen Rohstoffen verbessert und auf mögliche Handlungsoptionen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei vielen Metallen noch erhebliche Materialverluste und Umweltbelastungen entlang der Gewinnungs-, Verarbeitungs-, Nutzungs- und Recyclingkette gibt, die durch geeignete Maßnahmen vermindert werden können. Rücknahme-, Sammel- und Aufbereitungssysteme gilt es insbesondere in den Bereichen zu fördern, in denen Produkte (neu, gebraucht oder als Abfall) in Länder exportiert werden, in denen bislang keine hinreichende Verwertung stattfindet. Im Inland bestehen wiederum erhebliche Potenziale der künftigen Nutzung von Sekundärrohstoffen, wenn die Art und Menge der in Infrastrukturen gespeicherten Materialien, ihre absehbare Verwendungsdauer und der künftige Ort des Abfallanfalls künftig regelmäßig erhoben werden, um so die Grundlage für ein "Urban Mining" zu legen, das wirksam zur Schonung natürlicher Ressourcen beiträgt.

1 Umweltrelevante metallische Rohstoffe (AS2.1)

1.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes

Metallische Rohstoffe sind bedeutend für eine Vielzahl technischer Anwendungen. Mit dem Fortschritt der Technik in vielen Bereichen weitete sich der Einsatz von Metallen in den letzten Jahrzehnten rasant aus (mehr Anwendungen, mehr Metalle). Entsprechend wird heute das Gros der ca. 60 Metalle technisch routinemäßig eingesetzt. Neben die bekannten Eisen- und Buntmetalle, die bezogen auf die eingesetzte Menge dominieren, sind eine Vielzahl von Metallen getreten, die überwiegend für spezifische Funktionen in geringen Mengen eingesetzt werden. In diesem Sinne können sie als *selten* bezeichnet werden. Weiterhin sind diese Metalle wegen ihrer teilweise begrenzten Verfügbarkeit in der Diskussion – deshalb werden einige von ihnen auch als kritische Metalle bezeichnet. Typische Anwendungsbereiche mit jeweils starken Zuwachsraten sind Elektro- und Elektronikgeräte (EuE, inkl. IKT¹ und PV²-Technologie), Medizintechnik und Nanotechnologie.

Da diese seltenen Metalle bislang deutlich weniger Aufmerksamkeit in der Fachliteratur erhielten als Eisen- und Buntmetalle, ist auch die Informationslage zu Ihnen relativ eingeschränkt. Das gilt insbesondere auch für die mit ihrem Einsatz verbundenen Umweltbelastungen und Materialverluste über den Lebensweg sowie ihre Bedeutung im sozio-industriellen Metabolismus. Übergeordnetes Ziel des MaRess-Arbeitsschrittes "Umweltrelevante metallische Rohstoffe" ist die Verbesserung der Wissensbasis zu den seltenen Metallen und damit die Schließung von Wissenslücken, um die Entwicklung geeigneter Strategien und Maßnahmen bezüglich Vermeidung, Substitution, ressourcenschonender Produktion und Kreislaufschließung (inkl. internationaler Aspekte) zu unterstützen. Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Screening potenziell umweltrelevanter Metalle: 66 Metalle³ bzw. Metallgruppen wurden hinsichtlich der Kriterien Reservenmenge, statische Reichweite, jährliche Produktionsmenge, Rohstoffpreis, geographische Konzentration von Produktion und Reserven, dissipative Nutzung, Umweltrelevanz (anhand von KRA, KEA und TMR) sowie des Einsatzbereiches analysiert. Anhand ausgewählter Kriterien wurden zehn im Projekt vertiefend zu untersuchende Metalle identifiziert.
- Vertiefende Analyse der zehn ausgewählten potenziell besonders relevanten Metalle: Zehn Metalle wurden genauer hinsichtlich ihrer lebenszyklusweiten Materialverluste und spezifischen Umweltbelastungen mithilfe einer einfachen Stoffflussanalyse untersucht.

¹ IKT: Informations- und Kommunikationstechnologie

² PV: Photovoltaik

³ Nicht untersucht wurden die Nichtmetalle, die Lanthanide und die Actinide.

- Handlungsoptionen: Ausgehend von den vertiefenden Untersuchungen wurden geeignete Maßnahmen und Strategien zur Verringerung der Materialverluste und Umweltbelastungen entlang des Lebenszyklus erarbeitet.

1.2 Ergebnisse

1.2.1 Klassifizierung der Metalle hinsichtlich Kriterien zur Umweltrelevanz und Seltenheit

Insgesamt wurden 66 Metalle nach verschiedenen Kriterien untersucht. Folgende Ergebnisse wurden hierbei zusammengeführt:

- Übersicht über die Einsatzbereiche mit Angabe der relativen Anteile am Gesamteinsatz; dazu Kurzbeschreibung des Einsatzes in den Bereichen EuE/IuK, Med und Nano;
- Produktion, Reserven, Reservenbasis und statische Reichweite;
- Geographische Konzentration der Primärproduktion und der Reserven;
- Bestimmung der dissipativen Nutzung und anderer problematischer Nutzungsmuster der Metalle;
- Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA), Globaler Materialaufwand (TMR) und Kumulierter Energieaufwand (KEA).

Die Messgrößen KRA und KEA wurden Umweltprofilen entnommen, die im UBA-Projekt "Indikatoren/ Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion" erarbeitet wurden; die Ermittlung des TMR basiert auf durch das Wuppertal Institut durchgeführte Untersuchungen.

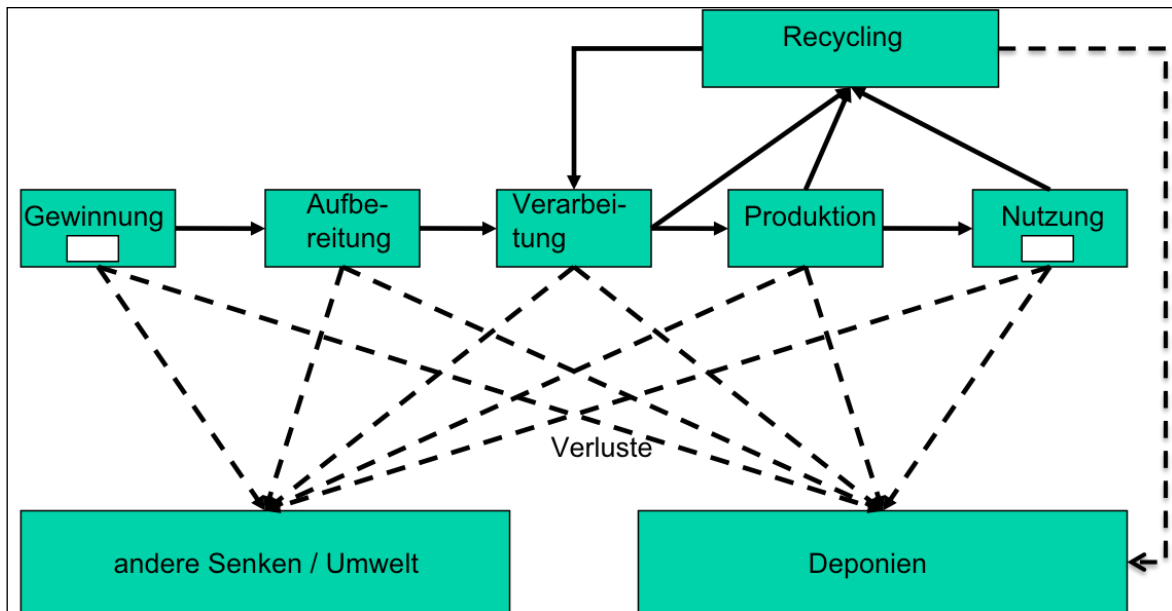
Als Kriterien für die Metallauswahl wurden die Größen KRA, KEA und TMR in Kombination mit der statischen Reichweite und der dissipativen Nutzung gewählt, wobei auch die zu erwartende künftige Entwicklung der Produktion der Metalle berücksichtigt wurde. Auf Grundlage der Klassifizierung der Metalle entlang der Kriterien wurden zehn vertiefend zu untersuchende Metalle ausgewählt: die Edelmetalle Silber (Ag), Gold (Au), Palladium (Pd), die Stahlveredler Mangan (Mn) und Nickel (Ni), die Schwermetalle Zinn (Sn), Zink (Zn) sowie die "Spezialmetalle" Gallium (Ga), Indium (In) und Titan (Ti).

1.2.2 Vertiefende Untersuchung zu zehn ausgewählten Metallen

Die Untersuchung des globalen Stoffhaushalts über den gesamten Lebenszyklus erfolgte für jedes der zehn Metalle nach dem gleichen Schema, um die Vergleichbarkeit zwischen den Metallen zu erhöhen (Abbildung 1). Für jeden Prozess des Systems wurden über den Lebenszyklus zum einen die relevanten Metallverluste und zum anderen relevante spezifische Umweltbelastungen bestimmt; diese Zusammenfassung

konzentriert sich auf die Metallverluste, die eine Erhöhung der Primärproduktion und der damit in der Regel verbundenen erhöhten Umweltbelastungen bedeuten⁴.

Abb. 1.1: Referenz-Metallsystem zur Darstellung der Metallkreisläufe und ihrer Verluste



Die unerwünschten Metallflüsse (Verluste) sind gestrichelt dargestellt. Die weißen Kästen sind Lager (stocks) des entsprechenden Metalls.

Die Stoffflusssysteme der einzelnen Metalle variieren wie erwartet stark. Bezogen auf die Materialverluste ergab sich folgendes, differenziertes Bild:

- *Relativer Materialverlust aus der Nutzungsphase:* Dies ist der jährliche Materialverluste aus Nutzung und Recycling bezogen auf den jährlichen Input in die Nutzung. Er schwankt um den Faktor 8; so beträgt er bei Zinn über 70 %, bei Gold weniger als 10 %; es handelt sich also um das minimale Recyclingpotenzial, das während Nutzungsphase und Recycling besteht⁵ (es würde durch weitere im Inland angesiedelte Prozesse erhöht);
- *Relativer Gesamtmaterialverlust:* Dies ist der gesamte jährliche Materialverlust entlang des Lebensweges bezogen auf den jährlichen Input in die Nutzung⁶. Er be-

⁴ Eine vollständige Beschreibung sämtlicher Umweltbelastungen konnte im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund der vielfältigen Prozesse bei der Herstellung und der Nutzung der Metalle nicht erfolgen.

⁵ Insofern befindet sich dieses Potenzial im Allgemeinen im Einflussbereich nationaler Politik, im Gegensatz zu den Potenzialen von Prozessen, die im Ausland statt finden und im "relativen Gesamtmaterialverlust" zusätzlich enthalten sind.

⁶ Aufgrund der Bezugnahme zum Input in die Nutzung sind Relationen über 100 % möglich.

trägt zwischen ca. 110% bei Mangan und ca. 20% bei Gold; es handelt sich also um das maximale Recyclingpotenzial, das global besteht.

Die Verluste der anderen Metalle liegen jeweils zwischen den Extremwerten. In der Studie wurde ferner dargestellt, in welchen Lebenszyklusabschnitten die relevanten Materialverluste auftreten (Tabelle 1). Es ist zu beachten, dass die Umweltrelevanz der Materialverluste beim Vergleich zwischen den Metallen variiert⁷, jedoch für einen Vergleich der spezifischen Umweltbelastungen, welche den Materialverlusten zugeordnet werden können, die Datenlage nicht ausreichte. Hier sind weitere Arbeiten zur Verbesserung der Datenlage erforderlich.

Tab. 1.1: Übersicht über die relativen Verluste innerhalb der einzelnen Prozesse sowie den gesamten jährlichen Materialverlust der untersuchten Metalle⁸

Die Symbole kennzeichnen die Bedeutung der Verluste aus den einzelnen Prozessen:
xxx = Anteil grösser 25 %, xx = Anteil zwischen 25 und 10 %, x = kleiner 10 %, o = keine nennenswerten Verluste, k.A. = keine Angabe

	Mn	Sn	Pd	In	Ni	Ag	Zn	Au
Gewinnung	o	o	xx	k.A.	xxx	xx	k.A.	xxx
Aufbereitung	xxx	xx	x	xxx	xx	xx	xxx	k.A.
Verarbeitung	xxx	x	x	k.A.	xx	k.A.	k.A.	k.A.
Produktion ⁹	x		x	x	x	k.A.	xx	xx
Nutzung	xx	xxx	xx	x	xxx	xxx	X	x
Recycling ¹⁰	k.A.	k.A.	xxx	x	k.A.	xx	k.A.	xxx

Bezogen auf den Input in die Nutzung betragen die lebenszyklusweiten Materialverluste (Werte gerundet auf 5 %):

Relativer jährlicher Verlust [%]	110	80-85	65	50	40-45	35	30	15-20
----------------------------------	-----	-------	----	----	-------	----	----	-------

⁷ Die Umweltbelastungen sind sowohl metallspezifisch, als auch prozessspezifisch, da der "ökologische Rucksack" mit Fortschreiten der Prozesse wächst.

⁸ Für eine Beurteilung der Verluste von Gallium und Titan lagen keine ausreichenden Ergebnisse vor, auf eine Darstellung wurde daher verzichtet.

⁹ Produktion umfasst gegebenenfalls die Raffination.

¹⁰ Inklusive sog. „downcycling“, bei dem das Metall seine spezifische Funktionalität verliert. In der Regel ist damit ein deutlicher Wertverlust verbunden.

1.3 Handlungsoptionen

Seit einigen Jahren und verstärkt während der Projektlaufzeit wurden diverse Fachartikel mit Bezug zu den Stoffströmen von seltenen und edlen Metallen veröffentlicht. Diese beschäftigen sich überwiegend mit den Möglichkeiten, das Recycling aus technischer, logistischer und institutioneller Sicht zu verbessern¹¹. In Kombination mit den spezifischen in den zehn Studien im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Recyclingpotenzialen¹² wurde folgendes, nicht abschließendes Set von Handlungsoptionen metallübergreifend betrachtet:

- Erhöhung der Sammelmenge von Altprodukten, die seltene Metalle in relevanten Mengen enthalten, in Deutschland und im Ausland; zum Beispiel von Elektroaltgeräten, die signifikante Mengen an Palladium, Gold und Silber enthalten, sowie von Altbatterien hinsichtlich ihres Mangangehaltes;
- Aufbau bzw. Adaption bestehender produktgruppenspezifischer Sammelsysteme z.B. für Kfz¹³ oder IKT, in Entwicklungsländern durch staatliche oder privatwirtschaftliche Programme, um ein anschließendes Recycling unter Anwendung der best available techniques vor Ort oder in entwickelten Ländern¹⁴ zu ermöglichen; dabei Bewahrung funktionierender Sammelsysteme mit günstigen Beschäftigungseffekten und Verminderung von Gesundheits- und Umweltbelastungen im informellen Recyclingsektor;
- Aufbau von länderübergreifenden Redistributionssystemen für Schrotte spezifischer Produktgruppen, welche für die Bewirtschaftung seltener Metalle relevant sind; zum Beispiel sollten im Rahmen der Ausweitung der Produktverantwortung für Katalysatoren in Altfahrzeugen die Sammelleistung in Ländern unterstützt werden, wo die Materialverluste am größten sind. Mögliche Maßnahmen sind die logistische Unterstützung von Sammelsystemen, Fachschulungen oder Abnahmevereinbarungen; mögliche Adressaten sind Hersteller von Fahrzeugen und/oder Katalysatoren bzw. Recyclingspezialfirmen (via freiwillige Selbstverpflichtung) (vgl. AS2.2); Anreiz für die Adressaten könnte die Sicherstellung langfristiger Sekundärrohstofflieferungen sein;
- Förderung einer tiefergehenden händischen bzw. automatisierten Zerlegung und Sortierung von Altgeräten, die eine seltene Metalle in relevanter Menge enthalten und bei denen die Rückgewinnungsrate erhöht werden kann, z. B. von Elektronik-

¹¹ Die in die Untersuchung einbezogene Literatur ist im Abschlussbericht des AS2.1 erläutert.

¹² Es ist zu beachten, dass die Materialverluste in dieser Studie als "theoretisches" (das bedeutet maximal zu vermutendes) Potenzial zur Verminderung von Verlusten angesehen werden. In einem weiteren Schritt sollten daher die verschiedenen technologischen und institutionellen Möglichkeiten hinsichtlich des „praktischen“ Potenzials bewertet werden, die Materialverluste zu verringern.

¹³ Kfz: Kraftfahrzeuge

¹⁴ Bei der Verschiffung von demontierten und selektierten Schrottbestandteilen zu (europäischen) BAT-Recyclinganlagen spricht man von „best of two worlds approach BAT“. BAT bedeutet "best available techniques".

schrotten (Laufwerke, Netzteile) oder Kfz. Hierfür muss in weiteren Projekten präzisiert werden, welche Bauteile die größten Potentiale beinhalten;

- Monitoring der Altgüterströme und der rückgewonnenen Metallmengen zur Ergebniskontrolle (Effektivität und Effizienz des Recyclings);
- Monitoring der Schnittstellen der Recyclingketten zur Erhöhung der Markttransparenz, dabei Einbezug aller am Aufbereitungsprozess beteiligten Akteure (Sammlung, Behandlung, Recycling);
- Aufbau eines kontinental bis regional angepassten Angebots von produktspezifischen Behandlungs- und Recyclingprozessen, das weltweit die Effektivität der Rückgewinnung seltener und edler Metalle durch differenzierte Behandlung der Altprodukte und Zuführung zu hochtechnischen Recyclinganlagen verbessert;
- Regelmäßige Bilanzierung der Behandlungsprozesse hinsichtlich seltener Metalle mit dem Ziel der Prozessoptimierung zur Aufkonzentrierung von seltenen Metallen in Recyclingfraktionen;
- Vergleichende Analyse und Bewertung von Re-Use und Recycling im Hinblick auf Rohstoffverbrauch und Umweltbelastungen unter Beachtung regionaler und produktgruppenspezifischer Unterschiede der Recyclingsysteme;
- Klassifizierung und Zertifizierung von Recyclingtechnologien nach Kriterien der Ressourceneffizienz und der Ressourcenschonung (Minderung des Rohstoffaufwandes und der Umweltbelastungen im Vergleich zur Primärroute);
- Kooperative Governance mit dem Ziel, verbindliche Qualitätsstandards der Behandlung und des Recyclings zu erreichen, ggf. Zertifizierung der Akteure (vgl. MaRes AS2.2);
- Formulierung eines nationalen bzw. internationalen Ziels zur Verminderung des Primärrohstoffverbrauchs von Metallen unter Einbezug der zur Produktion importierter Güter über die gesamte Produktionskette hinweg eingesetzten Rohstoffe, dabei Fokus auf ausgewählte Sektoren, in denen relevante Recyclingpotentiale bestehen (z.B. die Rückgewinnung eines bestimmten Anteils des Goldes aus Elektroaltgeräten und/ oder der Einsatz einer Mindestmenge von Sekundärmetallen in der Produktion);
- Lokalisierung von Marktversagen und Erarbeiten von möglichen Rahmenbedingungen, die die Markteinführung effektiver, aktuell unrentabler Behandlungs- und Recyclingsysteme für seltene Metalle ermöglichen.

Daneben ist die geographische Komponente der Stoffflüsse seltener Metalle zu berücksichtigen: Gewinnung, Produktion, Nutzung und das Recycling von Alt- und Neuschrotten sind im Allgemeinen räumlich heterogen verteilt. Aufgrund der geringen Um-

satzmengen bei den seltenen Metallen und der hohen Investitionskosten für Hightech-Recyclinganlagen sind nur relativ wenige zentrale Recyclinganlagen rentabel. Der Rückführung der seltenen Metalle nach der letzten Nutzung in die Rückgewinnung kommt damit eine wichtige Rolle zu. Die Herausforderung besteht darin, die Abfallphase von Altprodukten – vor allem wertstoffhaltiger Elektrokleingeräte – so zu organisieren, dass sie möglichst vollständig gesammelt werden. Neben der Sammlung ist die Behandlung vor dem eigentlichen Recycling entscheidend: Hier müssen die Altprodukte so sortiert und separiert werden, dass die seltenen Metalle möglichst vollständig in Fraktionen gelangen, die dann den hochspezialisierten Recyclinganlagen zugeführt werden. Es ist also aus ressourcenpolitischer Sicht erforderlich, insbesondere die grenzüberschreitenden Metallströme effektiv und effizient zu lenken und Sammel- und Behandlungssysteme aufzubauen, die eine hinreichende Sammlung und Aufbereitung sicherstellen.

Da bei jedem Lebenszyklus der Produkte erneut Verluste auftreten, kommt neben dem Recycling der tatsächlichen Produktlebensdauer¹⁵ für die Erhöhung der systemweiten Ressourceneffizienz potenziell eine relevante Rolle zu. Häufig konkurriert jedoch die Verlängerung der Produktlebensdauer mit Fortschritten in der Energieeffizienz, Fortschritten in der Leistungsfähigkeit der Produkte oder auch dem Modeaspekt von Produkten. Zur Bewertung aktueller Entwicklungen von Produktlebensdauern hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Materialeffizienz wird vorgeschlagen Szenarioanalysen durchzuführen.

Die Wissensbasis zu den umweltrelevanten, seltenen Metallen konnte im Rahmen von MaRes AS2.1 wesentlich erweitert und zusammengefasst werden. Trotzdem handelt es sich um einen Zwischenstand, da noch relevante Kenntnislücken und Unsicherheiten bestehen, die durch detailliertere Stoffflussanalysen auf Basis des bisher Erreichten näher untersucht werden sollten. Die größten Kenntnislücken hinsichtlich der Materialverluste bestehen bei den Metallen Gallium und Titan. Bzgl. der Umweltbelastungen über den Lebensweg bestehen bei allen Metallen relevante Lücken.

¹⁵ Gemeint ist hier im Gegensatz zur technischen Lebensdauer der Zeitraum vom Kauf bis zum Eintritt in das Abfallsystem.

2 Weltweite Wiedergewinnung von PGM (AS2.2)

2.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes

Der Einsatz von Platingruppenmetallen (PGM) mit den Hauptvertretern Platin, Palladium und Rhodium in technologieorientierten Anwendungen nimmt weltweit weiter zu. Treibende Faktoren sind die wachsende Nachfrage aus der Industrie, insbesondere aus den Anwendungsbereichen Autoabgaskatalysatoren und Elektro(nik)geräte. Mit diesen Anwendungen wächst gleichzeitig das sekundäre Rohstoffpotenzial, das nach der Nutzungsphase wieder zurück gewonnen werden könnte.

Aus ressourcen- und umweltpolitischer Perspektive kann das PGM-Recycling einen wichtigen Beitrag zur Rohstoffsicherheit, zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung leisten.

- **Stichwort Rohstoffsicherheit:** da die Primärrohstoffgewinnung bei PGM auf sehr wenige Länder (vor allem Russland und Südafrika) begrenzt ist, kann mit jeder Tonne recyceltem Material die Abhängigkeit von diesen Ländern und von Preisentwicklungen in oligopolistisch strukturierten Märkten vermindert werden.
- **Stichwort Ressourcenschonung:** Die PGM-Vorkommen sind begrenzt. Mit Recycling können diese Vorkommen geschont werden und stehen damit auch für nachfolgenden Generationen zur Verfügung.
- **Stichwort Umwelt- und Klimaschutz:** das PGM-Recycling ist mit deutlich geringeren Umweltbelastungen verbunden als die primäre Rohstoffgewinnung.

Die ökonomischen und ökologischen Vorteile des PGM-Recyclings werden jedoch bisher nicht hinreichend ausgeschöpft, insbesondere da die PGM in wichtigen Anwendungsfeldern wie den Autoabgaskatalysatoren und Elektro(nik)geräten nach der Nutzungsphase in relevanten Mengen in Länder ohne angemessene Recyclinginfrastrukturen exportiert werden und somit für die globale Kreislaufführung verloren gehen. Gleichzeitig nehmen im Elektronikbereich dissipative Anwendungen zu; die geringen Mengen können mit herkömmlichen Recyclingverfahren nicht zurückgewonnen werden.

Vor dem Hintergrund dieser Ausgangslage bestand im Teilprojekt „Weltweite Wiedergewinnung von PGM“ die Aufgabe, in ausgewählten Handlungsfeldern Vorschläge zur Verbesserung des internationalen PGM-Stoffstrommanagements zu entwickeln. Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Identifizierung der potenziell problematischen Exportströme und signifikanten PGM-Verluste differenziert nach unterschiedlichen Anwendungsfeldern.
- Vertiefende, akteursbezogene Untersuchung der Anwendungsfelder „Autoabgaskatalysator“ und ausgewählter „Elektro(nik)-Produkte“, Defizitanalyse bezüglich Er-

fassung, dissipativer Verluste und regulatorischer Defizite in ausgewählten Zielländern.

- Ableitung von Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung und Substitution von PGM und zur Verbesserung der internationalen Kreislaufführung. Bewertung der vorrangig zu verfolgenden Optionen.

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Rahmenbedingungen und Trends im PGM-Recycling

Knapp 50 Prozent der (Primär- und Sekundär-)Produktion von Platin, Palladium und Rhodium finden Verwendung in Autoabgaskatalysatoren. Weitere wichtige Anwendungsgebiete sind Elektronik, Schmuck und Prozesskatalysatoren in der Chemie und Erdölraffination.¹⁶

Die PGM-Nachfrage wird durch unterschiedliche marktliche und technische Faktoren beeinflusst. Nach den Umsatzeinbrüchen durch die Wirtschafts- und Finanzkrise 2009 hat sich im Jahre 2010 wieder ein mengenbezogenes Wachstum der Primärproduktion eingestellt, welche insbesondere durch die technologischen Anwendungsfelder getrieben wird. Eine zunehmende Bedeutung erlangen hierbei auch Anwendungsfelder wie die Photovoltaik und die Elektromobilität (vgl. Hagelüken/Buchert 2010). Der PGM Verbrauch in den verschiedenen Nachfragesektoren und deren Entwicklung in den letzten 3 Jahren ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Aus den dargestellten Werten ist ersichtlich, dass es während der Weltwirtschaftskrise 2009 eine deutliche Verschiebung von technologiebezogenen Anwendungen zu wertbezogenen Nutzungen gegeben hat und der Verbrauch im Krisenjahr 2009 insgesamt gesunken ist. Der Bereich Autoabgaskatalysatoren (Autokats) ist für alle drei Metalle das deutlich dominierende Anwendungsfeld. Signifikant ist hier, dass sich die Anteile zwischen Platin und dem kostengünstigeren Palladium erheblich verschoben haben.¹⁷ Im Bereich der Glasanwendungen sind bei Platin und Rhodium deutliche Wachstumschübe in der Nachfrage zu erkennen, aber auch der Verbrauch in der Chemieindustrie nach Platin und Palladium weist steigende Werte auf.

¹⁶ Siehe hierzu im Detail auch die Tabelle 2.1

¹⁷ Während in Benzinmotoren zu großen Teilen Palladium eingesetzt wird, kommt bei Diesel-Fahrzeugen bisher hauptsächlich das wesentlich teurere Platin zum Einsatz, das auch bei den niedrigeren Betriebstemperaturen effektiv wirkt (vgl. Brenscheidt 2001, 24).

Tab. 2.1: Entwicklung des globalen Verbrauchs von Platin, Palladium und Rhodium bezogen auf unterschiedliche Anwendungsfelder (2008-2010) in Tonnen

<i>Platin</i>	2008	2009	2010	<i>Palladium</i>	2008	2009	2010	<i>Rhodium</i>	2008	2009	2010
Autokats	103,6	61,9	84,6	Autokats	126,5	114,8	146	Autokats	21,7	17,5	20,6
Elektro	6,5	5,3	6,3	Elektro	38,8	36,0	39,8	Elektro	0,08	0,08	0,1
Invest	15,7	18,7	12,3	Invest	11,9	17,7	18,9				
Schmuck	58,4	79,6	68,6	Schmuck	27,9	21,9	17,8				
Glas	8,9	0,2	10,3					Glas	0,9	0,5	1,6
Medizin	6,9	7,0	7,2	Dental	17,7	18,0	17,5				
Chemie	11,3	8,2	12,7	Chemie	9,9	9,2	10,9	Chemie	1,9	1,5	1,8
Andere	15,0	11,3	12,0	Andere	2,1	1,9	2,2	Andere	0,6	0,5	0,5
Verbrauch	226,5	192,6	214,3	Verbrauch	235,0	219,7	253,4	Verbrauch	25,4	20,2	24,8
Recycling	51,8	39,8	52,1	Recycling	45,7	40,5	52,3	Recycling	6,4	5,3	6,7
Net.-Verbr.	174,6	152,8	162,1	Net.-Verbr.	189,2	179,1	201,1	Net.-Verbr.	18,9	14,9	18,0
Lager	6,2	18,0	8,2	Lager	18,0	22,1	1,2	Lager			

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Berechnung in t auf der Basis der Angaben in Johnson Matthey 2010. Die Werte für 2010 sind Schätzwerte auf der Basis der ersten 9 Monate, Wachstumswerte in fett.

Das Recycling hat zunehmend strategische Bedeutung für die Rohstoffsicherung, da es erhebliche Probleme bei der Ausdehnung der Primärproduktion gibt, die in Russland an die Nickelproduktion gekoppelt ist und in Südafrika immer wieder durch die mangelnde Energieversorgung beeinträchtigt wird.

Trotz dieser Engpässe gibt es immer noch große Unterschiede bei der Kreislaufführung der PGM. Im Bereich industrieller Anwendungen, z.B. Industriekatalysatoren, werden Recyclingraten bis zu 90 % erreicht (vgl. Saurat/ Bringezu 2008 u. 2008a). Demgegenüber sind die Recyclingquoten im Bereich der Konsumgüter deutlich schlechter. Beispielsweise beträgt der Beitrag des Recyclings zur Versorgung mit Palladium bei Autoabgaskatalysatoren 2010 26 % (2006 waren es 20 %). Im Bereich der elektronischen Anwendungen stieg die Quote ebenfalls von 19 % im Jahr 2006 auf 31 % im Jahr 2010 (nach JM 2010, S. 36). In der Summe können die Recyclingwerte 2010 voraussichtlich deutlich verbessert werden, was (JM 2010) darauf zurückführt, dass in den Industriestaaten zunehmend effektivere Recyclingsysteme eingeführt werden¹⁸. Hinsichtlich der Werte in 2010 ist aber auch zu beachten, dass aufgrund des Preisverfalls 2009 viel sekundäres Material gelagert wurde, welches dann zeitverschieben erst 2010 die Refiner erreicht hat. Ob sich diese hohen Werte stabilisieren werden, ist daher fraglich.

¹⁸ Allerdings muss beachtet werden, dass JM 2010 diese Recyclingquoten als Anteil am jeweiligen Produktionsinput der Weltregionen ermittelt und dies nichts mit einer abfallbezogenen Recyclingquote zu tun hat.

Ein wichtiger Trend ist die zunehmende Internationalisierung der PGM-Stoffströme. Ein steigender Teil der produktbezogenen Quellen für das Recycling verlagert sich in die neuen Wachstumsökonomien der großen Schwellenländer. Entsprechend versuchen die internationalen Metallkonzerne Sammelstrukturen aufzubauen, um ihre „Integrated Smelters“¹⁹ mit Input zu versorgen. Diese Aktivitäten finden vielfach außerhalb des Abfallregimes statt und sind von Land zu Land sehr unterschiedlich.

Über den Export von gebrauchten (und auch neuen) Konsumgütern wie Kraftfahrzeugen und Elektrogeräten aus Deutschland bzw. aus der EU werden signifikante PGM-Mengen in Drittländer verlagert, die über keine adäquate Recyclinginfrastruktur verfügen (Russland, Mittelasien, Südostasien, Naher Osten, Westafrika). Dieser Problematik wurde im Rahmen der Projektbearbeitung der Bereiche „Autokatalysatoren“ (siehe Abschnitt 2.2.2) und „Elektronikgüter“ (siehe Abschnitt 2.2.3) besondere Beachtung geschenkt.

2.2.2 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Autoabgaskatalysatoren“

Im Jahr 2008 wurden nur ca. 15 % der ca. 3 Millionen endgültig stillgelegten Fahrzeugen in Deutschland verwertet, 8 % gingen als Gebrauchtwagen direkt in Nicht-EU-Staaten²⁰, 50 % wurden als Gebrauchtwagen in EU-Staaten und zwar überwiegend in die neuen EU-Beitrittsländer exportiert (BMU/UBA 2010), von wo ein Teil für eine weitere Nutzungsphase nochmals ins Nicht-EU-Ausland gelangt. Für 23% ist der weitere Verbleib statistisch nicht belegt. Der Stand der statistischen erfassbaren Ausfuhren ist in der Abbildung 2.1 dargestellt.

Aus den verschiedenen statistischen Quellen ist keine verlässliche Abschätzung der PGM-Verluste möglich. Die Erfassung im Rahmen der Außenhandelsstatistik ist vor allem im innereuropäischen Handel aufgrund der umsatzbezogenen Meldeschwellen unvollständig, die Erfassungskriterien sind in den einzelnen Mitgliedstaaten unterschiedlich, insgesamt können Exportketten über mehrere EU-Länder nicht nachvollzogen werden. Vor diesem Hintergrund ist zu begrüßen, dass die EU-Kommission und Eurostat eine Anleitung zur Vereinheitlichung und Verbesserung der Datenbasis veröffentlicht haben (Europäische Kommission 2010).

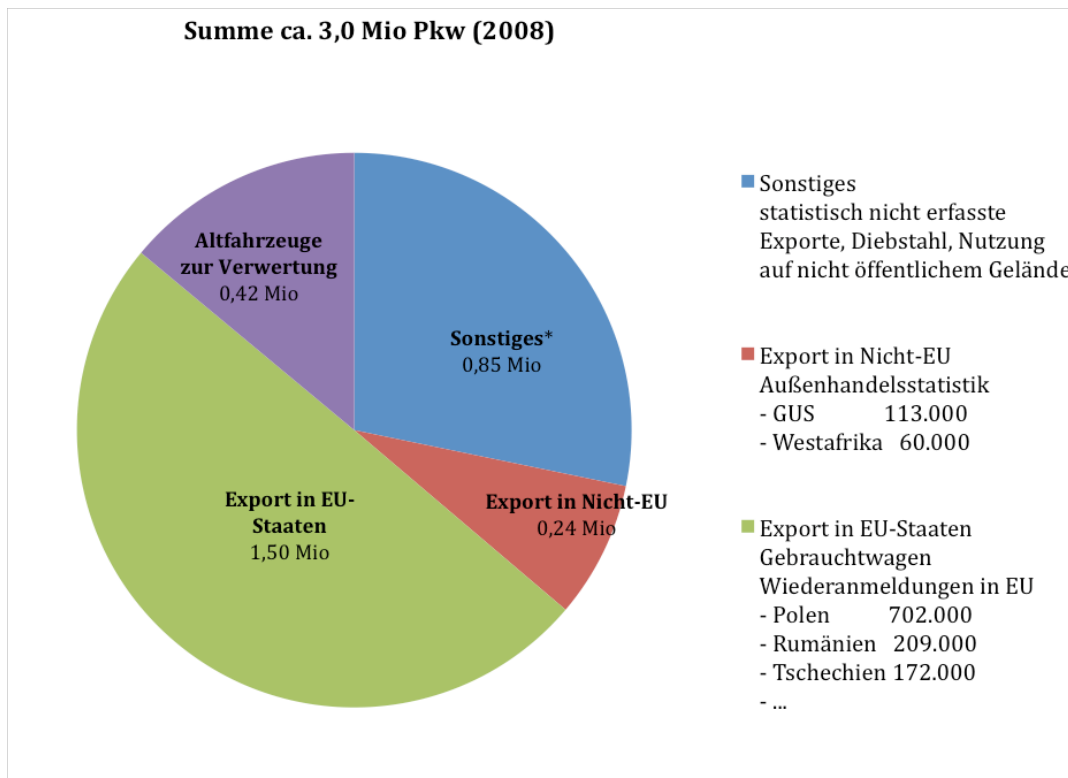
Aufgrund der geführten Expertengespräche und der Länderstudien ist erkennbar, dass die Exporte in die GUS-Staaten vor allem nach Mittelasien (z.B. Kasachstan) an Bedeutung gewinnen. Damit erweitert sich der Kreis derjenigen Länder, in denen der Fahrzeugbestand schnell wächst, die aber gleichzeitig über keine effektive Recyclinginfrastruktur und keine Kontrollen hinsichtlich des Fahrzeugzustandes verfügen. Wie

¹⁹ Integrated Smelters betreiben ein Multimetall-Recycling. Sie sind in der Lage unterschiedliche Eingangsstoffe zu verarbeiten, Schadstoffe und organische Stoffe abzutrennen und in der eigentlichen Metallschmelze viele verschiedene Metalle zurückzugewinnen

²⁰ Von diesen 8% beträgt der Anteil von Ländern mit guter Recyclinginfrastruktur (Norwegen, Schweiz, USA, Japan etc.) laut Außenhandelsstatistik etwa 10 %.

die durchgeführten Länderstudien zeigen, ist für die weitere Entwicklung der PGM-Potenziale die Entwicklung der Fahrzeugbestände und deren Ausrüstung mit Abgaskatalysatoren entscheidend.

Abb. 2.1: Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge im Jahr 2008



Quelle: BMU/UBA 2010 nach Angaben des Kraftfahrtbundesamtes (Außerbetriebsetzungen, Wiederanmeldungen) und des Statistischen Bundesamtes (Abfallstatistik, Außenhandelsstatistik)

Insbesondere in Osteuropa wie z.B. den russischen Stadtregionen (Moskau, St. Petersburg) wird in den nächsten Jahren die Mehrheit der Fahrzeuge mit geregelter 3-Wege-Katalysatoren ausgerüstet sein. Für diese Fahrzeuge ergibt sich aufgrund der langen Betriebsdauer und der schlechten Wartung in Kombination mit oft schlechten Straßenverhältnissen ein erhebliches Austrittsrisiko von PGM in die Umwelt aus beschädigten Katalysatoren. Wo in den Zielländern außerhalb der EU doch punktuell eine Katalysator-Demontage erfolgt, führt dies zu nicht nachvollziehbaren Handelsströmen mit den Materialien im Rahmen so genannter Grauer Märkte.

Um die dargestellten Probleme zu bewältigen, wurde im Rahmen des Projektes für die industriellen und staatlichen Akteure eine Roadmap entwickelt und mit ihnen auf einem Workshop in Berlin diskutiert (Lucas/Wilts 2009). Grundsätzlich wurden die hierin vorgeschlagenen Maßnahmenfelder durch die Workshop-Teilnehmer als geeignet angesehen, um das PGM-Recycling bezüglich der Autoabgaskatalysatoren zu verbessern:

- Eine Vereinbarung/Commitment zwischen den Akteuren in der Wertschöpfungskette „Katalysator-Recycling“ über Qualitäts- und Umweltstandards in der Redistributions-Logistik und den Verfahren zur Katalysator-Entmantelung und PGM-Rückgewinnung.
- Selbstverpflichtung der Fahrzeug- und Katalysator-Hersteller auf Mindestsammel- u. Recyclingquoten für PGM sowie Quoten für den Einsatz von Sekundär-PGM.
- Aufbau von Redistributionssystemen in den Zielmärkten der 2. und 3. Fahrzeugnutzung durch die Industriepartner (Automobilindustrie/Katalysatorhersteller) im Rahmen ihrer Produktverantwortung zwecks Behandlung in integrierten und hierfür spezialisierten Hüttenwerken.
- Kennzeichnung der Katalysatoren z.B. durch Einsatz der RFID-Technologie zur Unterstützung der Redistribution und, um die Exportströme und den letztendlichen Verbleib der Katalysatoren nachvollziehen zu können, Verbesserung der statistischen Erfassung durch präzisere Deklarationspflichten für den Handel mit gebrauchten Fahrzeugen.

Für diese Maßnahmen ergibt sich ein Zeitfenster von ca. 10 - 15 Jahren, da erst zu diesem Zeitpunkt ein hoher Anteil an Fahrzeugen zur Entsorgung ansteht, der über eine Autoabgasregelung verfügt (je nach Zielland zu differenzieren).

2.2.3 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Elektro- und Elektronikgeräten“

Das Aufkommen an Elektroaltgeräten wächst in der EU schneller als alle anderen Abfallfraktionen aus Haushalten (vgl. UNU 2008, 3). Technisch sind beim Recycling von Leiterplatten, die den Großteil des eingesetzten Palladiums enthalten, Rückgewinnungsquoten von bis zu 95% erreichbar, die wesentlichen Defizite liegen in der Erfassung einerseits und in der Behandlung und Aufbereitung andererseits.

Ein wesentliches Problem ist darin zu sehen, dass relevante Mengen an gebrauchten Elektrogeräten den europäischen Wirtschaftsraum verlassen. Nach (Sander/ Schilling 2010) wurden im Jahr 2008 ca. 155.000 t gebrauchte Elektrogeräte und Elektroaltgeräte aus Deutschland exportiert, davon alleine etwa ca. 2 Mio. Monitore. Global muss man davon ausgehen, dass davon nur etwa 10% überhaupt einem Recycling zugeführt werden (vgl. LaDou et al. 2007 und UNEP 2010). Unter der Annahme international bindender Verpflichtungen zu hochwertigen Recyclingstandards könnte mittelfristig jedoch durchaus ein internationaler Markt für Langlebigkeit (Re-use) aufgebaut werden.²¹

²¹ Vgl. die OECD Arbeiten zum Sustainable Materials Management und den Arbeiten zu Rahmenbedingungen der Ressourcenpolitik im Projekt MaRes, insbesondere ‚Internationaler Metall-Covenant‘ und ‚Ressourcenzertifizierung (RIZL)‘.

Die vertiefend untersuchten Produktbereiche Monitore und Mobiltelefone, die beide Palladium enthalten, zeichnen sich durch unterschiedliche Ausgangslagen aus: Während Mobiltelefone in der Regel legal als funktionsfähige Gebrauchtgeräte mit einem positiven Marktwert exportiert werden, handelt es sich bei alten Bildschirmen (vor allem CRT-Monitoren) häufig um illegale Exporte, bei denen die Exportkosten unter den Entsorgungskosten in Deutschland liegen.

Aber auch im Inland ergeben sich Defizite in der Kreislaufführung, wenn Geräte nicht über die davor vorgesehen Systeme erfasst und anschließend einem hochwertigen Recycling zugeführt werden. Für beide Bereiche Mobiltelefone und Monitore zusammen wurde für Deutschland beim gegebenen Stand der Technik ein zusätzliches theoretisches Recyclingpotenzial von ca. 0,75 t PGM berechnet, was die gesamte europäische Nettonachfrage für den Elektronikbereich übertreffen würde (vgl. JM 2010).

Die auf Basis dieser Analyse entwickelten Maßnahmenvorschläge setzen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen an und zielen auf eine verbesserte Koordination von bereits bestehenden Einzelinitiativen im Bereich gebrauchter Elektronikgeräte und Elektroaltgeräte. Grundsätzlicher Ansatz ist eine Stärkung der Herstellerverantwortung für die Nachnutzungsphase seiner Produkte, wie sie auch im ElektroG vorgesehen ist, bisher aber durch legale und illegale Exporte unterlaufen wird (vgl. Wilts 2009). Im Einzelnen sollten folgende Maßnahmen vorrangig verfolgt werden:

- Ansätze zum Technologie- und Wissenstransfer sollten in solche Entwicklungs- und Schwellenländer ausgeweitet werden, in denen die Nutzungsphase von Elektro- u. Elektronikgeräten endet (sowohl von importierten als auch aus Eigenproduktion). Diese Länder zeichnen sich meist durch sehr hohe Sammelintensität aus, es fehlt jedoch vollständig an der notwendigen Recyclinginfrastruktur (vgl. Yu et al. 2010). Hier lassen sich erhebliche Win-Win-Potenziale erschließen, wenn die Edelmetalle z.B. auf den demontierten Leiterplatten anschließend den international vernetzten Smeltern zugeführt werden anstatt im gesundheits- und umweltgefährdenden „Hinterhofrecycling“ zu landen. – Die erzielbaren Erträge übersteigen deutlich die Transportkosten (vgl. Hagelücken 2010).
- Für den Bereich Mobiltelefone besteht die Notwendigkeit, die Erfassungsquote im Inland deutlich zu steigern. Vorbilder für optimierte Erfassungssysteme z.B. mit ausgewiesenen Recyclinggebühren in Kombination mit einer intensiven Öffentlichkeitsarbeit (nationaler Aktionstag, Unterrichtsmaterialien etc.) existieren z.B. in der Schweiz (vgl. SWICO 2009). Einen zusätzlichen Anreiz könnten Pfandsysteme für Handys darstellen (vgl. MPPI 2009).
- Bei Monitoren ist der illegale Export von Altgeräten durch produktspezifische Festlegungen zur Gebrauchstauglichkeit für die Abgrenzung von Alt- und Gebrauchtgeräten einzudämmen. Darüber hinaus sollten die Geräte im Rahmen der Sperrmüllabfuhr nicht länger vom Straßenrand eingesammelt werden, sondern durch direkte Abholung von Elektro- und Elektronikschrott aus den Haushalten, um die Berau-

bung von Wertstoffen und Beschädigungen zu vermeiden (Sander/Schilling 2010). Die Transparenz und Sicherheit wird insgesamt erhöht.

2.3 Übergreifende Aspekte eines internationalen Governance-Ansatzes zur Steuerung der Stoffströme im PGM-Recycling

Die durchgeführten Untersuchungen in beiden Handlungsfeldern haben ergeben, dass das internationale PGM-Stoffstrommanagement von der internationalen Marktentwicklung geprägt ist und der Einfluss nationaler Abfallregimes auf das Stoffstrommanagement sehr begrenzt ist. Auf der internationalen Ebene sind verbindliche zwischenstaatliche Regelungen im Rahmen des WTO-Regimes (freier Welthandel) nicht in Sicht. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, einen kooperativen Governance-Ansatz zu verfolgen, der in den Wertschöpfungsketten des PGM-Recyclings zu verbindlichen Qualitätsstandards führt. Eine führende Rolle bei der Durchsetzung solcher Standards können die international tätigen Metallkonzerne wie Umicore und Johnson Matthey übernehmen, da sie direkt von einer solchen Qualitätssteigerung profitieren würden.

Derartige kooperative Strukturen können bilateral oder multilateral von den Regierungen in der EU und den ihnen nachgeordneten Umweltbehörden unterstützt und gefördert werden. Auch UNEP – die mit ihrem Resource-Panel in diesem Bereich bereits aktiv ist - könnte eine wichtige koordinierende Rolle übernehmen, um z.B. den Erfahrungsaustausch beim Aufbau von effektiven Recyclingsystemen zu verbessern (vgl. UNEP 2010). Entscheidend wird jedoch sein, ob die in Europa führenden Raffinationsbetriebe und deren Kunden aus der Automobilindustrie und der Elektroindustrie sich aktiv beteiligen.

Staatliche Stellen können insgesamt dazu beitragen, den Informationsfluss in den sekundären PGM-Ketten zu verbessern, indem Berichtspflichten vor allem des Handels eingefordert werden. Des Weiteren sollten die anzustrebenden Recycling-Standards (Beste Verfügbare Technik) in Rechtsvorschriften (Altfahrzeugverordnung, Elektrogesetz) Eingang finden. Ein weiterer Ansatzpunkt für staatliches Handeln ist das bestehende Technologie- und Qualifizierungsgefälle zwischen den OECD-Staaten und den Zielländern gebrauchter PGM-haltiger Konsumgüter.

Geeignetes Instrument hierfür wäre der Aufbau eines spezifischen Technologietransfer- und Beratungsprogramms, um in den Zielländern eine geordnete Sammlung, qualitativ hochwertige PGM-Redistribution und Vorbehandlung zu initiieren (zugeschnitten vor allem auf die EU-Beitrittsländer und ausgewählte CEEC-Staaten). Eine Veränderung der Redistributionswege durch den Aufbau neuer Metallschmelzen in den Zielländern ist derzeit nicht in Sicht, insofern ist es wahrscheinlich, dass es unter der Bedingung des freien Welthandels die gegenwärtigen Rückführungsstrukturen zu den Metallschmelzen weiter ausgebaut werden.

3 Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen (AS2.3)

3.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes

Infrastruktursysteme können mit erheblichen Umweltbelastungen durch den Ressourcenaufwand für die Errichtung und Unterhaltung sowie die Entsorgung der entstehenden Abfälle verbunden sein. Auch vor dem Hintergrund steigender Rohstoffpreise und einer zunehmenden Versorgungsunsicherheit sollte es Ziel eines nachhaltigen Ressourcenmanagements sein, den Verbrauch an Primärrohstoffen absolut zu verringern und den Anteil an Sekundärrohstoffen zu erhöhen.

Um hierfür die nötigen Basisinformationen bereit zu stellen, wurden in AS2.3 des MaRess-Projektes relevante netzgebundene Infrastrukturen in Deutschland hinsichtlich ihres jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung und Neubau, sowie ihrer gespeicherten Materialien (Stoffdepots) analysiert. Dabei wurden vier Infrastrukturtypen betrachtet:

- Verkehrsnetze,
- Trink- / Abwassernetze,
- Telekommunikations- und IT-Kommunikations-Netze,²²
- Elektrizitäts-, Gas- und Fernwärmenetze.

Die Errichtung und Erhaltung von Infrastruktursystemen sind mit erheblichen Stoffströmen verbunden. Eine Analyse der in Infrastrukturen gebundenen Materialspeicher und jährlich anfallenden Materialflüsse liefert die Datenbasis, mit deren Hilfe gezielt Ansätze zur Ressourcenschonung abgeleitet und diskutiert werden können. Zudem liefert dieses AP Informationen, welche Materialien in welcher Menge bei einem Rückbau dieser Infrastrukturen potenziell als Recyclingmaterial zur Verfügung stehen würden („urban mining“). Die in MaRess AP 2.3 ermittelten Daten können zudem dafür genutzt werden, die stoffliche Dimension bestimmter energetischer Ausbauziele (z.B. DENA-Netzstudien im Stromsektor) abzuschätzen.

Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- Phase I: Identifizierung relevanter Infrastrukturbereiche / Referenz-Systeme;
- Phase II: Bestimmung der aktuellen Bestandsgrößen und des Materialspeichers der Referenzsysteme;
- Phase III: Bestimmung der jährlichen Materialflüsse der Referenzsysteme;

²² Im folgenden wird hierfür die übliche Abkürzung IuK d.h. Information und Kommunikation verwendet.

- Phase IV: Entwicklung von ersten Handlungsempfehlungen und Formulierung weiteren Forschungsbedarfes.

Sowohl die Bestands- als auch die Flussgrößen wurden bis auf wenige Ausnahmen mittels eines bottom-up-Ansatzes erfasst, bei dem die Länge bzw. die Anzahl der einzelnen Referenzsysteme mit spezifischen Materialkoeffizienten verknüpft und auf den Gesamtbestand bzw. auf die jährliche Erweiterung / Erneuerung hochgerechnet wurden. Soweit möglich wurden die anfallenden Materialmengen durch Abbruch von Infrastrukturbestandteilen in gleicher Weise ermittelt. Die spezifischen Materialkoeffizienten stammen zum einen aus der Auswertung relevanter Datenbanken und Literatur (Ecoinvent; diverse Ökobilanzierungen und Lebenszyklusanalysen), und wurden zum anderen durch umfangreiche eigene Recherchen ergänzt. So wurden Herstellerangaben für bestimmte Infrastrukturkomponenten verwendet oder entsprechende Experten in Forschungseinrichtungen, Herstellerfirmen und Netzbetreibern befragt. Für die systematische Erfassung von Inputs, Outputs und Beständen von Infrastrukturen nach Materialien wurde die Methode der Materialflussanalyse (MFA) genutzt und mit Hilfe von Flussdiagrammen grafisch dargestellt. Zur verbesserten Abschätzung der ökologischen Relevanz der einzelnen Referenzsysteme wurden die Bestands- und Flussgrößen zusätzlich mit ihren ökologischen Rucksäcken, d.h. den mit ihrer Herstellung verbundenen vorgelagerten Ressourcenaufwendungen (Primärmaterial, einschließlich genutzter und ungenutzter Extraktion) ausgewiesen.

3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

3.2.1 Verkehrsinfrastruktur

Im Bereich der Verkehrsinfrastruktur wurden sowohl die Straßeninfrastruktur, als auch die Schieneninfrastruktur und die Binnenwasserstraßen analysiert. Die Ingenieurbauwerke (Brücken und Tunnel) der Schieneninfrastruktur und der Bundesautobahnen waren ebenfalls Teil der Erfassung der gespeicherten Materialbestände sowie der jährlichen Materialflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen.

Die Materialbestände der deutschen Straßeninfrastruktur (über 7,3 Mrd. Tonnen) wurden über technische Straßenbaunormen, die den Aufbau verschiedener Straßenkategorien festlegen, für einen Quadratmeter Referenzstraße ermittelt und diese Werte auf der Basis von Referenzquerschnitten dann auf die bestehende Länge des deutschen Straßennetzes hochgerechnet. Die jährlichen Erneuerungsbedarfe wurden über die Nutzungs- bzw. Lebensdauer hochgerechnet.²³ Die hier erfassten Materialmengen ergeben sich aus der Betrachtung der Straßenflächen sowie der Ingenieurbauwerke an Bundesautobahnen. Andere Bereiche, die ebenfalls der Straßeninfrastruktur zuge-

²³ Soweit keine detaillierten Informationen vorlagen, wurde auch in den anderen Infrastrukturbereichen der Erneuerungsbedarf über die Lebensdauer ermittelt.

rechnet werden können, wie Fuß- und Radwege, Lärmschutzwände oder Schutzplanen waren nicht Teil der Analyse.

Der Materialbestand im Bereich der Schieneninfrastruktur (1,15 Mrd. Tonnen) konnte im Verlauf des Projektes dank der umfangreichen Daten eines parallel durchgeführten UBA-Projektes (Schmied/Mottschall 2010) in großer Detailtiefe ermittelt werden. Die Hochschätzung der gespeicherten Materialmengen in der Wasserstraßeninfrastruktur (über 200 Mio. Tonnen), einschließlich Binnenhafenanlagen, basiert im wesentlichen auf früheren Untersuchungen von Stiller (1995) und Manstein/Stiller (2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden.

Die gespeicherte Menge an mineralischen Rohstoffen in der Straßeninfrastruktur übersteigt die der anderen Infrastruktursysteme um das Mehrfache. Zudem sind die jährlichen Stoffflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen - im Gegensatz zu den anderen Infrastruktursystemen - vor allem durch die Instandhaltung der Infrastruktur bestimmt. So ist der jährliche Materialbedarf für die Instandhaltung im Straßenbau (104 Mio. Tonnen) fünfmal höher als der des Neu- und Ausbaus (21 Mio. Tonnen). Dabei sind Gemeindestraßen sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung in absoluten Größen auf Grund der Länge des Straßennetzes der größte Verursacher von Stoffflüssen²⁴. Auch im Schienennetz geht der Großteil der jährlichen Stoffströme in die Instandhaltung der Strecken. Eine Erweiterung findet dort nur noch in geringem Maße statt.

Die Datensituation lässt eine belastbare Analyse der Materialströme zur Instandhaltung von Wasserstraßen nicht zu. Daher konnte nur der Materialbestand für den Neu- und Ausbau abgeschätzt werden²⁵.

3.2.2 Wasser- und Abwasserinfrastruktur

Im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wurden auf der Basis einer Relevanzanalyse die folgenden Referenzsysteme identifiziert und untersucht:

- Infrastrukturen der Wasserversorgung:
Talsperren, Wasserwerke, Wasserspeicher, Leitungsnetz
- Infrastrukturen der Abwasserentsorgung:
Kanalnetz, Schächte, Regenentlastung, Kläranlagen

Zum Teil konnte für die Untersuchung auf bestehende Materialkoeffizienten aus anderen Untersuchungen zurückgegriffen werden, welche teilweise im Hinblick auf die deutschen Verhältnisse modifiziert wurden. Ergänzt wurden diese Daten um umfangreiche Recherchen in technischen Regelwerken, Produkthandbüchern, Fachliteratur

²⁴ Pro km sind Autobahnen der ressourcenintensivste Straßentyp.

²⁵ Die Instandsetzung von z. B. Schleusen ist allerdings nur schwierig von einem Ausbau zu unterscheiden. Häufig wird bei einer Instandsetzung die Schleuse erweitert und ausgebaut.

und Expertengesprächen. Damit konnte insgesamt in den meisten Fällen eine belastbare Datengrundlage geschaffen werden. Jedoch hat sich im Projektverlauf insbesondere im Bereich der jährlichen Flüsse gezeigt, dass eine Verbesserung der Datenbasis notwendig ist.

Bezüglich der in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur gebundenen Materialien ist auch hier die herausragende Bedeutung der mineralischen Baustoffe hervorzuheben, welche knapp 99% der insgesamt knapp 1,8 Mrd. Tonnen Baustoffe ausmachen. Dies liegt vorwiegend an der Rohrbettung der Leitungsnetze. Auch Beton (und hier vorwiegend Stahlbeton) spielt mit knapp 500 Mio. Tonnen bei der Konstruktion vieler Anlagen der Wasser- und Abwasserinfrastruktur eine große Rolle. Im Gegensatz dazu spielen Metalle (rund 20 Mio. Tonnen, davon überwiegend Stahl und Eisen) und Kunststoffe (< 2 Mio. Tonnen) nur eine untergeordnete Rolle. Als Hauptwerkstoffe im Leitungsbau sind sie zudem meist unterirdisch verbaut und damit schlecht zugänglich.

Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes resultiert im wesentlichen aus Neubau- / bzw. Rückbauaktivitäten und zu einem geringeren Maße aus unterschiedlichen Sanierungsverfahren.²⁶ Angesichts der lückenhaften Datengrundlagen sind die ermittelten jährlichen Materialflüsse mit etwa 1% des Gesamtmaterialbestandes wahrscheinlich unterschätzt. Dies gilt insbesondere für durch Instandhaltung induzierte Materialflüsse. Durch den Einsatz neuer Materialien (verstärkte Verwendung von Kunststoff) liegt der Materialinput bei Erneuerungs-Aktivitäten im Kanal- und Leitungsnetz sogar unter dem Material-Output. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine Annäherung an tatsächliche Erneuerungsraten (statt erforderlicher Erneuerungsraten) die Grundlage für die Berechnungen stellt. Gerade im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wird der Investitionsbedarf in die Instandhaltung als sehr hoch eingeschätzt, was steigende jährliche Materialflüsse nach sich ziehen würde. Die Angaben über den Investitionsbedarf schwanken allerdings stark. Während Kluge et al. (2003) von 150 bis 250 Mrd. Euro sprechen, kommen Reidenbach et al. (2008) nur auf einen kommunalen Investitionsbedarf von 65 Mrd. Euro für Ersatzinvestitionen im Wasser- und Abwasserbereich.

3.2.3 Energieinfrastruktur (Elektrizität, Gas, Wärme)

Die untersuchten Energieinfrastrukturen lassen sich in Energieerzeugungs- und Energieverteilungssysteme differenzieren. Im Rahmen von MaRes wurden neun verschiedene Arten der Stromerzeugung untersucht.²⁷ Nicht untersucht wurden zum einen Anlagen mit geringer Bedeutung für die deutsche Energieversorgung (z.B. geothermische Stromerzeugung) bzw. Energieerzeugungsarten, die häufig zunächst zur Eigenversor-

²⁶ In der Sanierung unterscheiden wir Reparatur, Instandhaltung und Erneuerung.

²⁷ Dies sind konventionelle Kraftwerke (Stein- und Braunkohle), Gaskraftwerke, Kernkraftwerke, und im Bereich der erneuerbaren Energiequellen Wasserkraft- und Windenergieanlagen (on-shore) sowie Biogasanlagen. Zusätzlich wurden noch Heizkraftwerke und Blockheizkraftwerke abgeschätzt.

gung dienen (Photovoltaik). Im Bereich der Energieverteilungsinfrastruktur wurden die Daten für die Strom-, Gas- und Wärmenetze erfasst.

Die Materiallager der Energieverteilungsnetze (650 Mio. Tonnen) sind - bedingt durch die Sandbettung der Stromkabel und der Gas- und Fernwärmerohre - deutlich materialintensiver als die Erzeugungsinfrastruktur (88 Mio. Tonnen). Ohne den verbauten Sand (585 Mio. Tonnen) sind allerdings im Bestand der Energieerzeugungsinfrastrukturen höhere Mengen an Rohstoffen gespeichert. Wie auch im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur bestimmen neben Sand vor allem Beton (94 Mio. Tonnen) und Stahl (37 Mio. Tonnen) die Materialbestände der Energieinfrastrukturen.

Konventionelle Kraftwerke sind in ihrer Mehrzahl am Ende ihrer Lebensdauer angelangt und müssen entweder ausgetauscht oder durch andere Energieerzeugungssysteme ersetzt werden – z.B. dezentral auf Grundlage erneuerbarer Energiequellen. Damit sind relevante Ressourcenaufwendungen verbunden. Unsere Analysen zeigen, dass auch dezentrale Einrichtungen mit hohen Stoffströmen für die Erstellung der Anlagen verbunden sind. Allerdings wird dies bspw. bei Windenergieanlagen in der Nutzungsphase mehr als kompensiert, da bis auf notwendige Instandsetzungen nur geringe Stoffströme induziert werden und pro kWh erzeugter Energie deutlich weniger Ressourcen beansprucht werden als bei fossilen Kraftwerken.

Mit dem Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen und einer regionalen Verschiebung des Angebots (Offshore Windenergie im Norden Deutschlands) muss mit verstärkten Investitionen für den Leitungsbau auf allen Spannungsebenen gerechnet werden. Insgesamt sind die jährlichen Materialströme im Bereich der Energienetze und der regenerativen Energieerzeugungseinrichtungen noch deutlich mehr durch Ausbau und Erweiterung als durch Erneuerung und Instandhaltung geprägt.

3.2.4 Telekommunikationsinfrastruktur

Das ursprüngliche Projektziel, die Telekommunikationsinfrastruktur sowohl für Festnetz als auch für Mobilfunk zu erfassen, konnte nicht umgesetzt werden, da keine frei zugänglichen Daten in ausreichender Qualität zum Ausbau des Festnetzes zu ermitteln waren. Firmendaten oder Daten der Bundesnetzagentur konnten aus Gründen der Wahrung von Geschäftsgeheimnissen bzw. Vertraulichkeitsverpflichtungen nicht genutzt werden. Als ein erster Schritt wurden im MaRes AP 2.3 deshalb zunächst Materialbestand und -flüsse des Mobilfunknetzes (GSM und UMTS) abgeschätzt. Für den Mobilfunkbereich lagen Informationen von Netzbetreibern und auch Sachbilanzen aus Lebenszyklusanalysen vor. Die Daten der unterschiedlichen Quellen waren jedoch nicht konsistent, so dass mit oberen und unteren Grenzwerten gearbeitet wurde. Wie in anderen Studien, die sich mit der stofflichen Dimension von IuK-Anwendungen beschäftigen (z.B. Borderstep-Studie im Auftrag des UBA zum Materialbestand von Rechenzentren), stößt die Aufteilung der einzelnen IuK-Komponenten des Mobilfunknetzes in unterschiedlichen Stoffkategorien aufgrund unzureichend differenzierter Daten

jedoch an Grenzen. Komplexere Bauteile können deshalb meist nur mit ihrem Eigengewicht, aber nicht mehr unterteilt nach verschiedenen Stoffgruppen erfasst werden. Die Dynamik der Entwicklung der Netztechnik führt zudem dazu, dass LCA-Studien schon nach zwei Jahren veraltet sind. Als wesentliches Ergebnis ist festzuhalten, dass die gespeicherten Mengen an Materialien (schätzungsweise 137.000 Tonnen) wie auch die jährlichen Stoffflüsse (schätzungsweise 17.000 Tonnen) im Bereich der Mobilfunkinfrastruktur sind im Vergleich zu den anderen drei Infrastruktursystemen unbedeutend sind. Eine Erfassung der Materialbestände im Bereich Festnetz würde die Bedeutung der IuK-Infrastruktur für den Materialbestand der deutschen netzgebundenen Infrastruktur deutlich erhöhen (Sandbettung der Kupferkabel), zumal die vorhandene IuK-Infrastruktur durch den zukünftig zu erwartenden Netzbau auf Glasfaserkabel bis zu den Kabelverzweigern ein großes Wiederverwertungspotential für Kupferkabel aufweist.

3.3 Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der jährlichen Materialströme für leitungsgebundene Infrastrukturen und weiterer Forschungsbedarf

Ein zunehmendes Materiallager in Infrastrukturen hat generell wachsende stoffliche und finanzielle Aufwendungen für die Instandhaltung und Erneuerung zur Folge. Deshalb sollte ein weiterer Aus- und Neubau grundsätzlich hinterfragt werden. Eine Begrenzung des Umfangs der Infrastruktursysteme ist eine notwendige Voraussetzung, sowohl stetig wachsende Unterhaltungskosten in den Griff zu bekommen, als auch zunehmenden Verbrauch natürlicher Ressourcen zu begrenzen.

Im Straßenbau könnte eine Überprüfung der Baunormen in Zusammenarbeit mit Straßenbauingenieuren und anderen Experten (z.B. Straßensicherheit) enorme Einsparpotentiale an mineralischen Rohstoffen ergeben (z.B. wäre eine Reduzierung der Straßenbreite bei Neubauprojekten und Sanierungen denkbar). Generell sollten Ressourcenaspekte in Investitionsentscheidungen von Infrastrukturen integriert werden und möglichst ressourcenschonende Technologien eingesetzt werden.

Soweit technisch möglich und ökotoxikologisch unbedenklich sollte für notwendige Instandhaltungs- und Ausbauarbeiten Recyclingmaterial verwendet werden. Auch bei der Sanierung von Infrastrukturen am Ende ihrer Lebensdauer (z.B. Brücken und Tunnel) sollten Verfahren mit einer möglichst geringen Ressourcenintensität eingesetzt werden. Für den Rückbau von Infrastrukturen ist – soweit ökotoxikologisch und strahlungstechnisch unbedenklich – ein größtmöglicher Anteil an Recycling anzustreben.

Für leitungsgebundene Infrastrukturen empfiehlt sich ein proaktives Flächenmanagement unter Nutzung der Bebauungsreserven im Bestand (Brachflächen, Baulücken, leer stehende und unterausgelastete Flächen), um den weiteren Ausbau der Leitungslängen zu vermeiden oder zu verringern. Bei Stadtumbauprozessen sollte der Erhalt der baulichen Dichte angestrebt werden, da die Effizienz von technischen Infrastruktu-

ren direkt davon abhängig ist. Daraus folgt, dass eine sinnvolle Rückbaustrategie von den Netzen her einem dispersen Rückbau vorzuziehen ist.

Aufbauend auf den Erfahrungen im Projekt konzentriert sich der weitere Forschungsbedarf auf die Verbesserung der Datenbasis. Viele Hochrechnungen beruhen auf Schätzungen, andere Infrastrukturbereiche mussten gänzlich unberücksichtigt bleiben, da entsprechende Daten nicht vorhanden oder öffentlich nicht zugänglich sind. Die Aufzeichnung von Lage und Typ (inkl. Materialgehalt) erdverlegter Leitungen in kommunalen Katastern sowie eine material- und ortsspezifische Inventarisierung und regelmäßige Fortschreibung des Materialbestands von Unternehmen der Verkehrs-, Wasser- und Energiewirtschaft würde in Zukunft eine genauere Abschätzung der stofflichen Bestände und Flüsse erlauben (insbesondere im Hinblick auf ihre spätere Verwertbarkeit). Desgleichen wäre anzustreben, dass die Netzentur berechtigt ist, in Abstimmung mit den Netzbetreibern, die vorhandenen Daten anonymisiert zur Verfügung zu stellen und so für wissenschaftliche und statistische Zwecke nutzbar zu machen. Insbesondere die jährlichen Materialflüsse für die Erneuerung und Instandhaltung von Infrastrukturen bedürfen einer genaueren Quantifizierung. Sinnvoll wäre daher bspw. die Zusammenarbeit mit Versorgungsunternehmen, um die Daten für ihr spezifisches Versorgungsgebiet (ländlich, städtisch) genauer zu erfassen und die in dieser Studie hier getroffenen Annahmen empirisch zu überprüfen.

Für eine mögliche Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes wäre mittels Ökobilanzierung/Materialintensitätsanalyse zu überprüfen, inwieweit alternative Konstruktionsweisen (z.B. Betondeckschichten statt Asphaltdeckschicht im Straßenbau) den Instandhaltungsbedarf reduzieren können und lebenszyklusweit besser abschneiden.

Um die künftig zu erwartenden Mengen für Neubau und Instandhaltung einerseits und Bauabfälle und Bauabbruch andererseits prognostizieren zu können, ist eine dynamische Modellierung der Materialflüsse erforderlich. Dazu wären weitere Analysen zur Altersstruktur der deutschen Infrastruktursysteme notwendig. Auch sollte mit hinreichender Flächendeckung untersucht werden, inwieweit Infrastrukturen bereits zurückgebaut werden, inwieweit Altsysteme aus dem Erdreich entfernt werden und welche Veränderungspotenziale hier zu erwarten sind.

Auf der Grundlage des vorliegenden Inventars der Materiallager in den wesentlichen Infrastruktursystemen sollte eine weitere Entwicklung von Informations- und Managementsystemen für ein potentiell „Urban Mining“ erfolgen, um so einen optimierten Einsatz von Sekundärmaterial aus und im Hoch- und Tiefbau zu ermöglichen.

Literatur

- Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V. und Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Stuttgart
- Althaus H.-J.; Chudacoff M.; Hirsch R.; Jungbluth N.; Osses M. and Primas A. (2007): Life Cycle Inventories of Chemicals. Final report ecoinvent data v2.0 No. 8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH
- Ausschuss für Gefahrstoffe (2009): Technische Regeln für Gefahrstoffe, Arbeitsplatzgrenzwerte, TRGS 900, Ausgabe: Januar 2006, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI Nr. 28: 605 (02.07.2009)
- Bauer, C. (2008): Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains. An analysis carried out for ALSTOM Power Services. PSI Bericht Nr. 08-05. Villingen
- BMU/UBA (2010): Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2008 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/germany_elv_quota_qualityreport.pdf (03.12.2010)
- Brenscheidt, T. (2001): Katalysatorträger: Ein Überblick. In: Hagelüken, C.: Autoabgaskatalysatoren. Renningen
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Entwicklung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Bringezu, S. (2000): Die Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen. Wuppertal Institut, Wuppertal, Wuppertal Paper 102
- Buchert, M.; Schüler, D. und Bleher, D. (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. UNEP DTIE report
- Buchert, M.; Deilmann, C.; Fritsche, U.; Jenseit, W.; Lipkow, A.; Rausch, L.; Schiller, G.; Siedentop, S. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland: Stofffluss-bezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „öffentliche Infrastruktur“. UBA-FB 000543. Berlin: Umweltbundesamt
- Classen M.; Althaus H.-J.; Blaser S.; Tuchschnid M.; Jungbluth N.; Doka G.; Faist Emmenegger M. und Scharnhorst W. (2009): Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch
- Doka, G. (2007): Wastewater Treatment. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report No. 13, Part IV. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Dones, R. (2007): Kernenergie. Ecoinvent report No. 6-VII. Villingen
- Dones, R.; Bauer, C.; Röder, A. (2007): Kohle. Ecoinvent report No. 6-VI. Villingen
- Edelmann, W.; Schleiss, K.; Engeli, H.; Baier, U. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Schlussbericht im Auftrag des Amtes für Energie. Bern
- Emmenegger, M.; Frischknecht, R.; Jungblut, N. (2003): LCA des Mobilfunks UMTS. Uster: ETHZ, Forschungsstiftung Mobilfunkkommunikation

- Europäische Kommission (2010): How to report on end-of-life vehicles according to Commission Decision 2005/293/EC. Revision by Eurostat 20th April 2010, Brüssel. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20Guidance%202010%2004%2020rev.pdf> (09.12.2010)
- Hagelüken, C. (2010): Recycling von Edel- und Sondermetallen als Schlüsselbeitrag zur Rohstoffsicherung. Beitrag auf der Konferenz Technologiemetalle, 22.09.2010, Frankfurt
- Hagelüken, C.; Buchert, M. (2010): Kritische Metalle für Zukunftstechnologien und ihr Recyclingpotenzial. Präsentation: Materialforum Rhein-Main, Hanau 18.01.2010. http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability/show_kritischeMetalle.pdf (11.11.2010)
- IFA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Gestis Stoffdatenbank
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (1996): Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE). München
- Frischknecht, R.; Tuchschnid, M.; Faist-Emmenegger, M. (2007): Strommix und Stromnetz. Ecoinvent report No. 6-XVI. Villingen
- Hillenbrand, T. (2009): Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Karlsruhe
- Jekel, M.; Remy, C.; Ruhland, A. (2006): Ecological Assessment of Alternative Sanitation Concepts with Life Cycle Assessment. Final Report for Subtask 5 of the Demonstration Project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater" (SCST)
- JM (Johnson Matthey) (2010): Platinum 2010. Hertfordshire. <http://www.platinum.matthey.com/publications/market-data-charts/> (11.11.2010)
- Kluge, T.; Koziol, M.; Lux, A.; Schramm, E.; Veit, A. (2003): Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck - Sektoranalyse Wasser, netWORKS-Paper No. 2
- Koziol, M.; Veit, A.; Walther, J. (2006): Stehen wir vor einem Systemwechsel in der Wasserver- und Abwasserentsorgung? Sektorale Randbedingungen und Optionen im stadttechnischen Transformationsprozess. netWORKS-Paper Nr. 22
- Kraftfahrzeugbundesamt (2008): Jahresbericht 2007. Flensburg
- Krestin, Oliver (2009): Improving the Recycling of PGM's from Automotive Catalytic Converters. Präsentation auf dem Stakeholder-Workshop des Wuppertal Instituts am 24.04.2009 in Berlin
- LaDou J et al. (2007): Export of Electronics Equipment Waste. In: International Journal of Occupational and Environmental Health, Ausgabe 14/2007; S. 1-10
- Lucas, R.; Wilts, H. (2009): Roadmap - Towards a more efficient recycling of PGM from catalytic converters on an international level. Presented at the experts' workshop at 24th April 2009 in Berlin
- Lünser, H. (1999): Ökobilanzen im Brückenbau. Eine Umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung. (Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser)

- Manstein, C.; Stiller, H. (2000): Anwendung der Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept auf österreichische Verkehrsträgersysteme. Studie des Vereins Faktor4+ im Auftrag des österreichischen Ministeriums für Wissenschaft und Verkehr, Klagenfurt
- MPPI (2009): Guideline on the collection of used mobile phones. Basel
- Okrusch, M. und Matthes, S. (2005): Mineralogie – Eine Einführung in die spezifische Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer Verlag
- Reckerzügl, T. (1997): Vergleichende Materialintensitäts-Analyse zur Frage der zentralen oder dezentralen Abwasserbehandlung anhand unterschiedlicher Anlagenkonzepte; Diplomarbeit an der Universität- Gesamthochschule Paderborn, Abteilung Höxter, erstellt am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
- Reidenbach, M.; Bracher, T.; Grabow, B.; Schneider, S.; Seidel-Schulze, A. (2008): Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen Ausmaß, Ursachen, Folgen, Strategien. Edition Difu. Berlin
- Sander, K.; Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. UBA-Texte Nr. 11/2010, Dessau
- Saurat, M.; Bringezu, S. (2008a): Platinum Group Metal Flows of Europe - Part I - Global Supply, Use in Industries and the Shift of Environmental Impacts. In: Journal of Industrial Ecology 12 (5/6): S. 754-767
- Saurat, M.; Bringezu, S. (2008b): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part II - Exploring the Technological and Institutional Potential for Reducing Environmental Impacts. In Journal of Industrial Ecology 13 (3), S. 406-421
- Schmied, M.; Mottschall, M. (2010): Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Teilgutachten im Rahmen des Forschungsvorhabens "Welches Schienennetz braucht Deutschland?" UBA. Dessau
- Siedentop, S.; Schiller, G.; Koziol, M.; Walther, J.; Gutsche, J.- M. (2006): Siedlungsentwicklung und Infrastrukturfolgekosten – Bilanzierung und Strategieentwicklung. Endbericht
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2009): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007; Fachserie 19 Reihe 2.1.; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt
- Statistisches Bundesamt (2009): Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik. (www.destatis.de)
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis) (2008): Umwelt – Abfallentsorgung. Fachserie 19, Reihe 1. Wiesbaden
- Stiller, H. (1995): Materialintensitätsanalysen von Transportleistungen (2). Binnenschifffahrt. Wuppertal Papers 41. Wuppertal: Wuppertal Institut
- SWICO (2009): 8 Millionen alte Handys warten in der Schweiz aufs Recycling. Medienmitteilung vom 01.4.2009, Zürich
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 6th ed. (2007) Wiley-VCH, Weinheim
- UNEP – United Nations Environment Programme (2010): Recycling of "Specialty Metals" - Key to Boom in Clean-Tech Sector, From Solar and Wind Power to Fuel Cells and Energy Efficient Lighting. Pressemitteilung. New York, 13.05.2010. Quelle: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.Print.asp?DocumentID=624&ArticleID=6564&l=en> (11.11.2010)

- UNEP (1991): Environmental Aspects of Selected Non-Ferrous Metals Ore Mining: A Technical Guide. United Nations Environment Programme, Industry and Environment Programme Activity Centre, Technical Report Series 5
- United Nations University (2008): Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment. Final Report. Bonn
- USGS (2009): Mineral Commodity Summaries (metall specific editions). U.S. Geological Survey, January 2009
- Von Rozycki, C.; Koeser, H.; Schwarz H. (2003): Ecology Profile of the German High-speed Rail Passenger Transport System ICE. In: International Journal of Life Cycle Assessment, 8(2), S. 83-91
- Wäger P.; Lang D.; Bleischwitz R.; Hagelüken C.; Meissner S.; Reller A.; Wittmer D. (2010): Seltene Metalle – Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, Zürich
- Weiland-Wascher, A.; Wuttke, J. (2007): Elektroaltgeräte – Abfall oder Produkt?! In: Müll & Abfall, Ausgabe 09/2007, S. 440 – 442
- Wilts, H. (2009): Erweiterte Produzentenverantwortung – Chancen und Grenzen. Institutionen ökologischer Nachhaltigkeit. Normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik. 9.-11. 3. 2009, Tutzing
- Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003, http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169 (20.12.2010)
- Yu, J.; Williams, E.; Ju, M.; Yang, Y. (2010) : Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers. Environmental Science & Technology